

**ZÁRÓJELENTÉSE**

*Témavezető: Dr. Tél Tamás*

**I. Kémiai frontok és reakciók áramlásokban**

Foglalkoztunk a kaotikus folyadékáramlásokban zajló kémiai és biológiai reakciók leírásával, különös tekintettel a front-terjedéssel kapcsolatos reakciókra. A front a reakciómentes esetben megjelenő fraktál struktúrák mentén feltekeredik, s ennek következtében a reakció egészen másként zajlik le, mint álló, vagy akár jól kevert közegben. A zárt tartományban történő kaotikus áramlásokban a fronterjedéssel járó reakciók termékei előbb-utóbb az egész tartományt betöltik. Kimutattuk, hogy ilyenkor a reakció szétterjedése jól jellemezhető egy időfüggő fraktáldimenzióval. Ennek alapján levezettünk egy új típusú reakcióegyenletet, amely jelenleg a legpontosabb elméleti értelmezését adja a Gollub által végzett kísérlet eredményeinek. A kísérletről és az általunk adott elméleti magyarázatáról a *Physics Today* (59, 15, 2006) beszámolt. A zárt áramlásokban zajló reakciók során feltártuk a nemegyensúlyi fázisátalakulással kialakuló ún. filamentális fázis szerkezetét. A módszer alkalmazható a tengerek felszíni hőmérsékletének jellemzésére, amelyhez ily módon határozott információs dimenziót sikerült rendelnünk.

Mivel a reakciók ott zajlanak le, ahol az áramláson belül a passzív részecskék felhalmozódnak, külön vizsgáltuk a sodródás jelenségét is. A forgó Földön mozgó örvénykettősök áramlási terében. érdekes átmenetet találtunk az örvények között csapdázottan maradó és az örvények mögött szálas fraktál eloszlásban hátrahagyott szennyezés lehetősége között. Vizsgáltuk a nyitott, akadályokat tartalmazó áramlásban tehetetlenül sodródó részecskék mozgásának kaotikussá válását. Amint a folyadék áramlása időfüggővé válik, a heteroklinikus pályák felbomlanak, a sodródás tranziens kaotikus viselkedést mutat. Tehát az áramlás időfüggése és a sodródás kaotikussá válása egyszerre következik be. Amennyiben a folyadékban nincsenek akadályok, a két átmenet nem egyszerre következik be, az áramlás időfüggése nem azonnal vezet a kaotikus sodródás felbukkanásához. A zárt tartományban zajló áramlások érdekes vonásai tárulnak fel, ha az áramlást „meglékeljük”, azaz sodródó részecskéket elszökötnék tekintjük, ha belépnek a lékbe. Ezt a Fölköpeny igen lassú áramlására alkalmazva, kimutattuk, hogy a Föld életkora nem eléggé hosszú ahhoz, hogy a magma anyaga jól kevertté, homogénné válhasson ennyi idő alatt, ami összhangban van a megfigyelt heterogenitásokkal. Ezt a módszert alkalmaztuk egy szél hajtotta tó áramlásának, és az abban történő szennyezés terjedés felderítésére is. A lékelt sodródás kérdésköre kapcsolatba hozható a statisztikus fizika egyik fundamentális problémájával, a Poincaré-féle első visszatérésekkel. Kimutattuk, hogy mind lékelési mind a visszatérése probléma lényege a tranziens kaotikus viselkedés, melyért a soha el nem szökő részecskékhez kapcsolódó kaotikus nyereghalmaz a felelős.

A kérdéskörben két összefoglaló cikkünk is megjelent a *Physics Reports*-ban, az egyik a reakciók időbeli kaotikusságáról, a másik pedig a térbeli és időbeli káoszról, általánosabban a térben kiterjedt rendszerekben megfigyelhető kaotikus tranziensekről.

**II. Végesméret-effektusok a hidrodinamikai instabilitás okozta sodródásban**

Kicsiny, de inerciával rendelkező részecskék sodródása eltér a tehetetlenség nélküli részecskék viselkedésétől folyadék áramlásban. Az egyik új tulajdonság az, hogy a nehéz

részecskék süllyednek. Ez a jelenség a felhőfizikától kezdve a szedimentációig, a szennyezések kicsapódásáig számos tudományterületen érdekes. A hidrodinamikai instabilitások következtében az áramlások időfüggőkké válnak. Az ilyen inhomogén áramlásokban a süllyedés bonyolult folyamat. Kimutattuk, hogy adott méretű részecskék egy kaotikus attraktorra húzódnak rá, mely fraktál szerkezetű. Ennek következménye az, hogy az adott helyen felfogott részecskék becsapódási idejében is megfigyelhető egy fraktál skálázás, mely elvileg ki is mérhető az esőcseppek becsapódási statisztikájában. Vizsgáltuk azt is, hogy mi történik akkor, ha a részecskék elegendően közel kerülve összeolvadhatnak, amikor pedig túl nagyra nőttek, akkor szétesnek. Az eredmény az, hogy kialakul egy stacionárius méret-eloszlás, mely jól összevethető a felhőkben megfigyelt esőcsepp-eloszlással.

Az egyedek véges méretének hatását vizsgáltuk a túlélésért versengő fajok együttélésére, és azt tapasztaltuk, hogy a részecskék eltérő tehetetlensége segíti az együttélést. Ennek oka, hogy az eltérő méretű és/vagy tehetetlenségű részecskék eltérő szálas fraktál struktúrákon helyezkednek el a keveredés hatására, ami csökkenti köztük a versengés erősségét. Így megmutattuk, hogy általános áramlásokban a versengő biológiai fajok aktivitását befolyásolja az egyedek véges mérete. Ez újabb adalék lehet a klasszikus plankton paradoxon megoldásához.

### **III. Populációdinamika kaotikus folyadékáramlásban**

Korábbi kísérletek és szimulációk kimutatták, hogy a ciklikus kölcsönhatásban álló, versengő fajok együttélésére jelentős hatást gyakorol a fajok térbeli eloszlása. Erős keveredés esetén a versenyt csak egy faj élheti túl, rövidtávú kölcsönhatás és limitált keveredés esetén azonban mindegyik faj együtt élhet. Megvizsgáltuk, hogy melyek azok a mechanizmusok, amelyek a keveredés közepes értékei esetén, folyadékáramlásban zajló kaotikus sodródás során az együttéléshez illetve kihaláshoz vezetnek. Azt találtuk, hogy a kaotikus keveredés erősségének növelése az egyedszámok erős koherens fluktuációival jár, és ezek okozzák végül a versengő fajok eltűnését. Ha a keveredés nem egyenletes, az együttélés lényegesen erősebb átlagos keveredés esetén is megvalósulhat izolált tartományokban.

Fonalas, szálas mikroorganizmusok (gombák és egyes baktériumok) geometriai jellemzőinek vizsgálata során korábban azt találták, hogy a telepek időben változó fraktálstruktúrát mutatnak. A telep globális növekedésének és az időben változó fraktálstruktúrájának a kapcsolatát vizsgáltuk meg, és azt tapasztaltuk, hogy a teljes biomassa és a telep geometriai jellemzői csatolt differenciálegyenletek segítségével írhatók le. Az egyenletrendszer megoldása valóságghű eredményeket szolgáltat

Megvizsgáltuk, hogy a diszkrét állapotú populáció dinamikai modellek periodikus viselkedése milyen jellegzetességeket mutat. Megmutattuk, hogy olyan modellekben, melyek a diszkrétizáció mértékére érzékenyek, a ciklusok között vannak a paraméter perturbációkra robusztus és érzékeny ciklusok. A laboratóriumi *Tribolium castaneum* adatsorok újraértékelésével kimutattuk, hogy az adatsorokban csak az általunk robusztusnak talált ciklusok vannak jelen szignifikánsan.

Az ökológiai adatsorok elemzésének egyik nehéz kérdése a külső zaj és a vizsgált rendszer nemlinearitásából származó dinamikai komplexitás szétválasztása. Mivel a populáció dinamikai folyamatokat diszkrét állapotú modellek írják le, tisztán determinisztikus modellekben komplex viselkedés (káosz) nem lehetséges. Rámutattunk, hogy éppen a külső zaj és a "determinisztikus váz" kölcsönhatása eredményezi a dinamikai komplexitást. A numerikus szimulációk alapján a zaj egy széles tartománya kijelölhető, ahol a zaj kaotikus

viselkedést generálhat egy erősen nemlineáris diszkrét állapotú dinamikai modellben. Kimutattuk azt is, hogy az ún. zaj-indukált káosz, vagyis az, hogy a zajmentes eset hosszúidejű dinamikája szabályos, de már gyenge zaj esetén is egy egészen más jellegű, kaotikus viselkedés jelenik meg, nagyon általános jelenség. E mögött a zajmentes eset tranziensen kaotikus viselkedése rejlik. Az elkerülhetetlen környezeti zaj miatt, zaj-indukált káosz számos populációdinamikai problémában megjelenik.

#### **IV. Egyéb kutatások**

*Környezeti áramlások kísérleti vizsgálata.* A Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium léte motivációt adott arra, hogy kísérleti vizsgálatokba is bekapcsolódjunk. Tanulmányoztuk golyók függőleges rezgését rétegzett folyadékban. Kimutattuk, hogy a véges méretű testek mozgására vonatkozó differenciálegyenletek nem érvényesek, mert nem veszik figyelembe a rezgéssel járó nemlineáris belső hullámok keltését. Új, közelítő egyenletet javasoltunk. Egy forgókádas elrendezésben (a ciklonképződést modellező Fultz-kísérletben) tanulmányoztuk a baroklin frontok instabilitása következtében kialakuló turbulenciában a hőmérsékletek-fluktuációinak statisztikáját. Meglepő módon a kapott eredmények kvantitatíve reprodukálják a meteorológiai állomások mért adatainak viselkedését, mely azt mutatja, hogy a kísérleti elrendezés a légkör alapvető áramlási formáit szépen modellezi. A tornádószerű örvények rendkívül egyszerű modelljének bizonyul a mágneses keverőkben kialakuló áramlás. PIV (Particle Image Velocimetry) módszerrel, valamint golyók és festékek nyomkövetésével kimutattuk, hogy az örvénymagon kívüli áramlás gyakorlatilag egy ideális örvényé. Az örvénymag komplex szerkezetet mutat, melyben a golyók mozgása kaotikus. Más témáink voltak az úgynevezett belső „tölengés” és „vízesés” és az ezzel járó frontok tanulmányozása víz alatti akadály jelenlétében (mely a Balaton vízének lassú mozgása kimutatására is lehetőséget ad), és a kétfázisú folyadékrendszerben fellépő termikus konvekció (ún. „láva lámpa” konvekció) kísérleti vizsgálata.

*Környezeti folyamatok nemlineáris idősor analízise.* Az utóbbi évek ugrásszerű fejlődést hozott a környezeti paraméterek nagy térbeli és időbeli felbontású észlelésében. Öröndetes tény, hogy ezen adattömeg egyre nagyobb része könnyen hozzáférhetővé vált/válik a kutatás számára. Az elmúlt időszakban létrehoztunk egy korszerű (SQL alapú) adatbáziskezelő rendszert, amellyel a legkülönbözőbb szempontok alapján lehet globális klimatológiai elemzéseket végezni nagy felbontású adatsorokon. Jelenleg a következő adatbázisok állnak rendelkezésünkre: GDCN Version 1.0 (kb. harmincezer meteorológiai állomás napi hőmérsékleti és csapadékadatai), TOMS Version 8 (globális ózon, aeroszol és UV sugárzási adatok műholdas állomásokról), valamint az ERA-40 projekt felszíni szélesebesség adatai 44 éves időtartamra, Európa területe fölött. Első lépésben elvégeztük a Föld egészére kiterjedően a napi hőmérsékleti adatok aszimptotikus korrelációinak vizsgálatát, ennek igen nagy jelentősége van a globális felmelegedéssel kapcsolatos numerikus szimulációk értékelésében. Hasonló korrelációs elemzéseket végeztünk a TOMS adatbázis ózon és aeroszol idősoraival, ennek során felfedeztünk egy komoly kalibrációs hibát. Jelenleg már dolgozunk a széladatok statisztikus feldolgozásán, fő célunk a szélenergia potenciál felmérése, az időbeli intermittencia jellemzésének kidolgozása, illetve előrejelzési módszerek fejlesztése.

*Égi mechanika.* Kimutattuk, hogy az égitestek forgási dinamikája egy kaotikus időfüggéssel gerjesztett nemlineáris rendszernek felel meg. Javasoltuk, hogy hagyományos leképezések helyett a fázistérbeli pontok sokaságának dinamikáját kövessük, melyről kiderült, hogy időfüggő fraktáldimenzióval jellemezhető. Ez a dimenzió exponenciális ütemben tart egy határértékhez, s a kitevő a káosz egy új jellemzője, mely nem egyezik meg a Ljapunov-exponenssel. A holdak szinkronizációs folyamatáról kimutattuk, hogy egyszerű dinamikai modell alapján jól megérthető.